نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی   DOI: 10.22067/civil.v30i2.51432   سال سی‌ام، شمارهٔ دو، ۱۳۹٦

تأثیر شیروانی بالادست بر انسداد و ظرفیت تخلیهٔ سرریز کلید پیانویی*

محمد پشته‌شیرانی[۱]   مجید رحیم‌پور[۲]   محمدمهدی احمدی[۳]

چکیده *سرریز کلید پیانویی یک سازهٔ کنترل جریان و حالت توسعه‌یافتهٔ سرریزهای غیرخطی است که ظرفیت تخلیهٔ دبی بسیار بالایی دارد، به‌طوری که برای یک دبی ثابت، عمق آب روی این نوع سرریز کم است و همین عامل احتمال انسداد ناشی از تجمع اجسام شناور را افزایش می‌دهد. در پژوهش حاضر بااستفاده از پنج هندسهٔ مختلف از سرریز کلید پیانویی با نسبت طول شیروانی خروجی به ورودی با مقادیر Bo/Bi=۰, ۰/۵, ۱, ۱/۲۵, ۱/۵ با هدف بررسی ظرفیت تخلیهٔ سرریز کلید پیانویی و همچنین بااستفاده از پنج نمونه‌چوب، انسداد ناشی از تجمع اجسام شناور و محتمل‌ترین مکان برای انسداد نمونه‌چوب‌ها در سرریزهای مذکور مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش طول تاج سرریز سبب افزایش ظرفیت تخلیه و کاهش استغراق در کلید خروجی سرریز می‌شود به‌طوری‌که مدل $PKW_{1.5}$ (Bo/Bi= ۱/۵) نسبت به مدل PKW_0 دارای ۲٦ درصد افزایش ظرفیت تخلیه می‌باشد. همچنین مدل $PKW_{1.25}$ در یک هد آب ثابت نسبت به سایر مدل‌های مورد مطالعه، حساسیت کم‌تری به انسداد دارد و احتمال گرفتگی ناشی از نمونه‌چوب‌های صاف در مدل مذکور نسبت به مدل‌های Bo/Bi=۰, ۰/۵, ۱ و ۱/۵ به‌ترتیب ۱۸/۷، ۳۹/۲، ۳۸/۹ و ۷/۸ درصد کم‌تر می‌باشد. همچنین در کلیهٔ مدل‌ها بیشترین انسداد در مدخل کلید خروجی صورت می‌گیرد.*

واژه‌های کلیدی سرریز کلید پیانویی، ظرفیت تخلیه، شیروانی، نمونه‌چوب، احتمال گرفتگی.

The Effect of Upstream Overhang on the Debris Blocking and Discharge Capacity of Piano Key Weirs

M. Poshteh-Shirani   M. Rahimpour   M. M. Ahmadi

Abstract *Piano Key Weir (PKW) is a flow control structure and it is a developed version of non-linear weirs that has a high discharge capacity, so that, for a specified discharge rate, the flow head above the weir is small, which may increase the likelihood of woody debris collection. In this study, the discharge capacity were investigated through 5 different geometry of the weir with the ratio exit to entrance lengh overhang with the values B_o/B_i=0, 0.5, 1, 1.25 and 1.5 and also the probability of woody debris collection using five models wood ad the location of the critical zone for obstructing the debris in the said weir was studied. The results indicate that increasing the length of the spillway crest increased discharge capacity, so that $PKW_{1.5}$ than to PKW_0 has increase discharge capacity to 26 percent. Also at a constant discharge $PKW_{1.25}$ than other models in this study is less sensitive to ocllecion. And likelihood of trunk woody debris collection at this model relative to the models with ratios of B_o/B_i=0, 0.5, 1 and 1.5 has 7/18, 2/39, 9/38 and 8/7 percent less respectively. Also in all models most obstruction was occurred in the entrance region of exit keys.*

Key words Piano Key Weir, Discharge Capacity, Overhang, Sample of Wood, likelihood of Collection.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹٤/۸/۲۳ تاریخ پذیرش آن ۹٦/۷/۳ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.

(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.   Email: rahimpour@uk.ac.ir

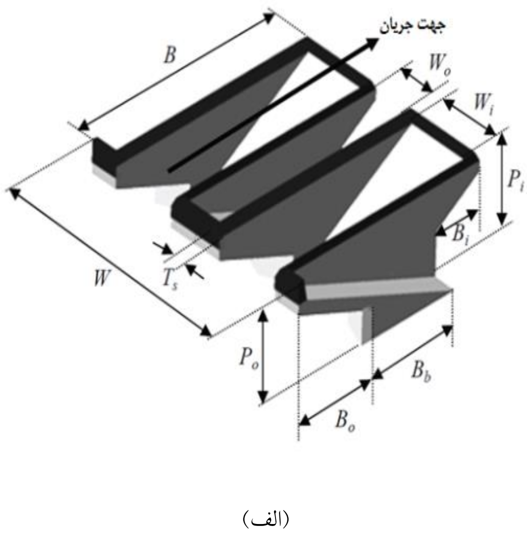
(۳) استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.

مقدمه

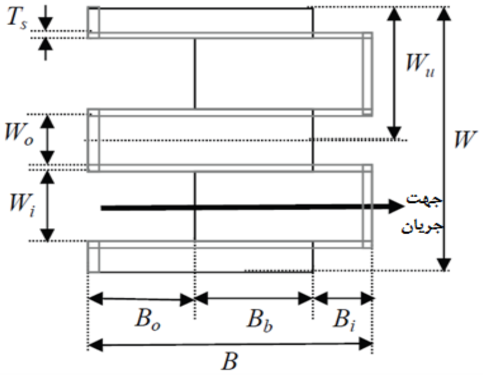
ظرفیت تخلیهٔ سرریزهای موجود را می‌توان با افزایش طول تاج سرریز، ضریب تخلیه، تراز آب روی سرریز یا ترکیبی از این موارد، افزایش داد. سرریزهای زیگزاگی (Labyrinth Weirs)، سازه‌های هیدرولیکی مناسبی برای افزایش طول تاج سرریز هستند [1]. سرریز کلید پیانویی حالت توسعه‌یافتهٔ سرریزهای غیرخطی (مانند سرریز کنگره‌ای) می‌باشد. این سرریز به‌عنوان سازهٔ کنترل جریان در حالت جریان آزاد طراحی شده است [2]. بلانک و لمپیریر [3] به‌منظور بهبود عملکرد سرریز زیگزاگی اولین طرح سرریز کلید پیانویی را معرفی کردند.

انواع سرریز کلید پیانویی را می‌توان براساس وجود و عدم وجود شیروانی‌های سرریز به چهار گروه تقسیم‌بندی کرد. سرریزی که دارای هر دو شیروانی باشد، سرریز کلید پیانویی نوع A و اگر سرریز فاقد شیروانی پایین‌دست، بالادست و هر دو باشد، به‌ترتیب نوع B، C و D می‌باشد [4,5]. تاکنون دستورالعمل استانداردی برای طراحی سرریز کلید پیانویی ارائه نگردیده است. پارامترهای هندسی متعددی در طراحی سرریز کلید پیانویی و عملکرد (رابطهٔ دبی- هد) آن مؤثر می‌باشند، اما بااین‌وجود میزان اطلاعات انتشاریافته از این سرریز محدود می‌باشد [6].

در شکل (۱) ساختمان سرریز کلید پیانویی نوع A نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱ ساختمان سرریز کلید پیانویی نوع A، الف) نمای کلی سرریز، ب) پلان سرریز (پرانگل و همکاران، ۲۰۱۱)

مطابق شکل مذکور پارامترهای هندسی نشان داده‌شده شامل عرض سرریز W، عرض کلید ورودی W_i، عرض کلید خروجی W_o، ارتفاع سرریز P، طول سرریز B، کل طول سرریز B_b، طول شیروانی پایین‌دست سرریز (کلید ورودی) B_i، طول شیروانی بالادست سرریز (کلید خروجی) B_o، ضخامت صفحات ساخت سرریز T_s، می‌باشند [7,8]. ازجمله پارامترهای هندسی مؤثر بر عملکرد هیدرولیکی سرریز کلید پیانویی، طول سرریز می‌باشد [۹]. اندرسون و همکاران [4] طی تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که اثر شیروانی‌ها بر ضریب تخلیه به‌مراتب بیشتر از اثر شیب‌های کلیدها است.

اومان و لمپیریر [2]، بارکودا و همکاران [10]، طی مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که سرریز کلید پیانویی نوع B نسبت به نوع A دارای ۱۰ درصد بازدهی بیشتر است و درصورتی تحقق می‌پذیرد که مقادیر N ($N=\frac{L}{W}$؛ L کل طول تاج سرریز) و P در هر دو مدل یکسان باشد. اومان و لمپیریر [11] با بررسی انواع مختلف سرریز کلید پیانویی با سه نسبت $\frac{B_i}{B_o}$=۲،۱،۰ به این نتیجه رسیدند، بازدهی هیدرولیکی سرریز با $\frac{B_i}{B_o}$=۰ (تیپ B) ۱۲ درصد و $\frac{B_i}{B_o}$=۱ (تیپ A) ۷ درصد بیشتر از سرریز با $\frac{B_i}{B_o}$=۲ است، البته در حالتی که نسبت $\frac{H_t}{P}$≤٤ (H_t کل هد آب روی تاج سرریز) باشد. ریبریو و همکاران [12] با مقایسهٔ سرریز کلید پیانویی با سرریز زیگزاگی به این نتیجه رسیدند که ساختار سرریز

کلید پیانویی تأثیر جزئی بر ساختار سد، دریچه‌ها و دیگر قطعات سد می‌گذارد و همچنین در یک هد ثابت، احتمال گرفتگی ناشی از اجسام شناور در سرریز کلید پیانویی کمتر از سرریز زیگزاگی می‌باشد [12].

تاکنون مطالعات اندکی برروی پدیدهٔ انسداد تحت تأثیر اجسام شناور در سرریزهای کلید پیانویی صورت گرفته است. اجسام شناور می‌توانند شامل شاخه و برگ درختان باشند. جاری شدن سیل در مناطق نسبتا خشک می‌تواند شاخه‌های خشکیده را با خود حمل کند و در حالت بحرانی‌تر سبب رانش زمین یا فرسایش سواحل رودخانه (Bank) و ورود درختان به رودخانه شود. انسداد ناشی از خرده‌چوب‌های شناور در سازه‌های کنترل جریان از قبیل سرریزها، باعث کاهش سطح عبور جریان و به‌تبع آن کاهش ضریب تخلیهٔ سرریز و ایمنی آن می‌شود [13].

اومان و لمپیریر [11] با مطالعهٔ احتمال انسداد در سرریز کلید پیانویی دریافتند که هیچ‌یک از خرده‌های (Debris) شناور در زیر شیروانی، در طول فرایند پر شدن مخزن بالادست سرریز گیر نمی‌کنند و همچنین در زمان سرریز شدن آب از روی سرریز کلید پیانویی، خرده‌ها باعث انسداد کلید ورودی در دبی‌های کم می‌شوند و همین امر موجب می‌گردد در حالتی که $\frac{H}{P} > 0.5$ (H_t و P به‌ترتیب کل هد بالادست و ارتفاع سرریز) ضریب تخلیه ۱۰ درصد کاهش یابد [11].

هنگامی‌که دبی عبوری سرریز افزایش می‌یابد خرده‌ها به‌سمت پایین‌دست سرریز حرکت می‌کنند و از روی سرریز عبور می‌کنند. خرده‌چوب‌ها، اغلب با پسماندهای شهری موجود در رودخانه ترکیب می‌شوند که این امر می‌تواند سبب آسیب و مشکلات جدی در سازه‌های هیدرولیکی از قبیل سرریزها، بدنهٔ پل‌ها و یا پایه‌های پل شود [14].

لایگیر [15] با بررسی مدل آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی سد گولورس (Goulours) فرانسه مشاهده کرد که افزایش عمق آب برروی سرریز نهایتا اجسام شناور انسدادیافته برروی سرریز را برطرف می‌کند؛ به این‌صورت که دریچهٔ اصلی سرریز قبل از سرریز مذکور خرده‌چوب‌ها را جذب می‌کند و اغلب اجسام شناور هنگامی‌که عمق آب روی سرریز بیشتر از یک متر باشد از روی آن شسته می‌شوند. طراحی و ساخت کلیدهای ورودی و خروجی سرریز کلید پیانویی با عرض کم باعث افزایش پتانسیل انسداد و انباشتگی خرده‌ها می‌شود. بالا بودن ضریب تخلیهٔ سرریز کلید پیانویی نسبت به سرریزهای خطی، برروی پدیدهٔ انسداد تأثیر می‌گذارد، بدین‌صورت که در یک دبی ثابت عمق آب برروی سرریز کلید پیانویی به‌مراتب کمتر از سرریزهای خطی است و همین امر موجب افزایش انسداد می‌گردد [16]. فیشر و همکاران [13] با بررسی پدیدهٔ انسداد در سرریز کلید پیانویی با سه هندسه مختلف و هشت نمونه‌چوب، مشاهده کردند که در پدیدهٔ انسداد قطر نمونه‌چوب‌ها نسبت به طول نمونه‌ها تأثیر بیشتری دارد، احتمال گرفتگی نمونه‌ها در حالتی که نسبت $\frac{D}{H} \geq 1$ (D قطر نمونه‌چوب) باشد برابر یک است و همچنین برای حالتی که این نسبت کوچک‌تر از ۰/۳ باشد تمامی نمونه‌ها از روی سرریز عبور می‌کنند، نمونه‌چوب‌های شاخه‌دار (Rootstock) نسبت به نمونه‌های صاف نسبت به گرفتگی حساس‌تر بوده‌اند و احتمال انسداد این نمونه‌ها در حالتی که $\frac{D}{H} \geq 0.5$ باشد معادل یک و همچنین برای مقادیر $\frac{D}{H} \leq 0.1$ تمامی خرده‌ها از روی سرریز عبور می‌کنند.

منصوری و احدیان [17] با بررسی آزمایشگاهی تأثیر دیواره سپری بر انسداد سرریز کلید پیانویی بااستفاده از دو نمونه‌چوب صاف و شاخه‌دار به این نتیجه رسیدند که احتمال انسداد کامل نمونه‌چوب‌های صاف و شاخه‌دار به‌ترتیب در نسبت $\frac{D}{H} \geq 1$ و $\frac{D}{H} \geq 0.5$ رخ می‌دهد. همچنین اگر مقدار نسبت مذکور کمتر از ۰/۳ و ۰/۱ باشد، به‌ترتیب احتمال انسداد نمونه‌چوب‌های صاف و شاخه‌دار صفر می‌باشد.

باتوجه به آنچه در بخش مقدمه ذکر شد، در این تحقیق پدیدهٔ انسداد ناشی از اجسام شناور بااستفاده از پنج هندسهٔ مختلف از سرریز کلید پیانویی و بهره‌گیری از پنج نمونه‌چوب با قطر و طول متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

باتوجه به آنچه در بخش مقدمه اشاره شد، یکی از چالش‌های پیش‌رو در طراحی سرریز کلید پیانویی، تعداد پارامترهای هندسی مؤثر بر ظرفیت تخلیه این سرریز می‌باشد. تابع کلی پارامترهای هندسی مؤثر بر ظرفیت تخلیهٔ سرریز کلید پیانویی را می‌توان به‌صورت معادلهٔ (۱) برشمرد:

[illegible]

$$T_s, D, L_d, H, Q, \rho, \mu, \sigma, g, \pi) = 0 \qquad (۱)$$

در رابطهٔ مزبور، ارتفاع سرریز P، عرض سرریز W، عرض کلید ورودی W_i، عرض کلید خروجی W_o، طول سرریز B، کل فونداسیون سرریز B_b، طول شیروانی پایین‌دست سرریز (کلید ورودی) B_i، طول شیروانی بالادست سرریز (کلید خروجی) B_o، ضخامت صفحات ساخت سرریز T_s، عمق آب بالادست سرریز H، دبی جریان Q، قطر نمونه‌چوب‌ها D، طول نمونه‌چوب‌ها L_d، لزجت دینامیکی μ، جرم واحد حجم سیال ρ، کشش سطحی σ، شتاب ثقل g، احتمال انسداد سرریز π می‌باشد. بااستفاده از روش آنالیز ابعادی، پارامترهای بدون بعد این تحقیق به‌صورت رابطهٔ (۲) ارائه می‌شود:

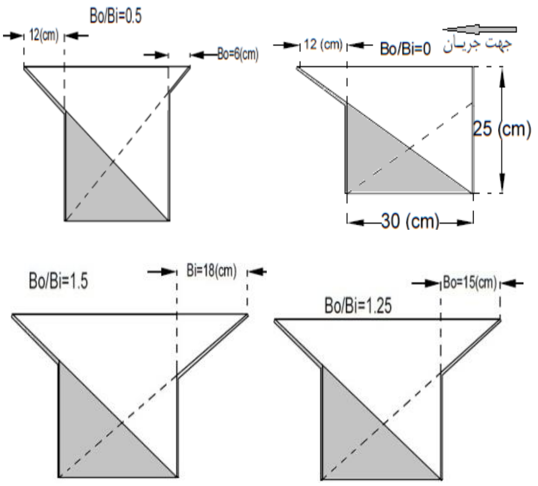
$$\pi = f(\frac{}{W_o}, \frac{}{W}, \frac{}{H}, \frac{i}{B_o}, \frac{}{H}, \frac{l}{D}, \frac{l}{H}, R_e, W_e) \qquad (۲)$$

در رابطهٔ فوق عدد رینولدز R_e و عدد وبر W_e می‌باشد. در این تحقیق عدد رینولدز جریان در طول فرایند آزمایش مقداری بیش از ۲۰۰۰ دارد و جریان در محدودهٔ متلاطم می‌باشد که در این حالت از عدد رینولدز صرف‌نظر می‌شود، همچنین ارتفاع آب روی سرریز بیش از ۳ سانتی‌متر بوده است، لذا اثر کشش سطحی و به‌تبع آن عدد وبر نادیده گرفته شده است. مقادیر عرض کلید ورودی، عرض کلید خروجی و ضخامت سرریز در مدل‌های موردمطالعهٔ این تحقیق ثابت می‌باشد درنتیجه می‌توان از پارامترهای $\frac{T_s}{W}$ و $\frac{W_i}{W_o}$ صرف‌نظر کرد. بنابراین رابطهٔ (۳) به‌عنوان رابطهٔ نهایی معرفی می‌شود.

$$\pi = f\left(\frac{P}{H}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{D}{H}, \frac{L_d}{D}, \frac{L_d}{H}\right) \qquad (۳)$$

مشخصات مدل

کلیهٔ آزمایش‌های این پژوهش در کانال آزمایشگاه مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان به‌طول ۸ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام گردیده است. دیوارهای کانال از جنس شیشه و کف آن فولاد ضد زنگ است، همچنین شیب کف کانال صفر می‌باشد. مدل‌های سرریز کلید پیانویی مورداستفاده در این تحقیق از جنس شیشه با ضخامت ٤ میلی‌مترهستند و دارای نسبت طول شیروانی خروجی به ورودی، $\frac{B_o}{B_i} =$ ۰, ۰/۵, ۱, ۱/۲۵ و ۱/۵ می‌باشند. کلیهٔ مدل‌ها در یک متری انتهای کانال نصب شده‌اند و در شکل (۲) و جدول (۱) مشخصات هندسی سرریزهای موردمطالعه ذکر شده است.



شکل ۲ نمایی از سرریز کلید پیانویی با نسبت‌های Bi/Bo =0, 0.5, 1.25, 1.5

جدول ۱ پارامترهای هندسی متغیر مدل‌های موردمطالعه

B_i/B_o	۰	۰/۵	۱	۱/۲۵	۱/۵
L/W	٤/۲۲	٤/٦۹	۵/۱٦	۵/۳۹	۵/٦۲
نماد مدل	PKW_0	$PKW_{0.5}$	PKW	$PKW_{1.25}$	$PKW_{1.5}$

از آنجایی که در این آزمایش‌ها نسبت $\frac{H_t}{P} < 0.6$ می‌باشد، نسبت $\frac{W_i}{W_o}$ برابر ۱/۵ درنظر گرفته شده است و به‌دلیل آن‌که نسبت به سایر مقادیر دارای بیشترین ضریب تخلیه می‌باشد [6]، لذا میزان عرض کلید ورودی و خروجی

مدل‌های موردمطالعه به‌ترتیب ۱۵ و ۱۰ سانتی‌متر می‌باشند.

نمونه‌های چوب

در این آزمایش از دو مدل چوب که یک نمونهٔ آن شامل چوب‌های صاف و مدل دوم چوب‌های شاخه‌دار می‌باشند، برای بررسی پدیدهٔ انسداد استفاده شده است (شکل ۳). هدف از انتخاب چنین نمونه‌هایی نزدیکی شکل مدل‌های چوب مورداستفاده به حالت طبیعی بوده است. نمونه چوب‌های صاف از نظر قطر و اندازه خود به چهار دسته تقسیم می‌شوند که در جداول (۲ و ۳) سایر مشخصات این نمونه‌ها آورده شده است.



شکل ۳ نمایی از نمونه‌چوب‌های مورداستفاده

جدول ۲ مشخصات نمونه‌چوب‌های صاف

دسته‌بندی نمونه‌ها	۱	۲	۳	٤
قطر نمونه، D (میلی‌متر)	۳	۵	۷	۱۰
طول نمونه، T (سانتی‌متر)	۸	۱۰	۱۲	۱۵

جدول ۳ مشخصات نمونه‌چوب‌های شاخه‌دار

مشخصات	قطر نمونه (میلی‌متر)	طول نمونه (سانتی‌متر)	تعداد شاخه
حداقل	۳	۹	۲
متوسط	٦/۷	۱۷/٤۳	٤
حداکثر	۱٤	۳۲	۸

روند کلی آزمایش‌ها در این تحقیق بدین صورت بوده است که پس از ایجاد تراز آب مدنظر روی سرریز، یک دسته چوب را انتخاب کرده و تعدادی نمونه، حداقل ۲۰ و حداکثر ۳۳ عدد از آن دسته را در فاصلهٔ حداقل ۲ متر از بالادست سرریز به‌طور تصادفی در قسمت‌های مختلف کانال رها می‌کنند. در هر مرحله از آزمایش بعد از انسداد نمونه‌ها روی سرریز مدت زمانی صبر می‌شود تا اطمینان حاصل گردد که نمونه‌های انسدادیافته در روی سرریز دیگر حرکت نمی‌کنند و در مرحلهٔ بعد نمونه‌های انسدادیافته برروی سرریز برطرف می‌شوند و مورد شمارش قرار می‌گیرند. در این پژوهش مجموعا ۲۵۵ آزمایش انجام شده است. در شکل (٤) پدیدهٔ انسداد در سه مدل موردمطالعه نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ٤ نمایی از انسداد در سه مدل، الف) Bi/ Bo=۱/۲۵، ب) Bi/ Bo=۰/۵ ، ج) Bi/ Bo=۰ و نمونه‌چوب‌های شاخه‌دار

نتایج و بحث

نتایج حاصل در این تحقیق به سه بخش الف) ظرفیت تخلیه، ب) احتمال گرفتگی و ج) محتمل‌ترین مکان برای انسداد در سرریزهای موردمطالعه تقسیم می‌شوند. درادامه هر بخش به‌طور مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ظرفیت تخلیه

با افزایش عمق آب روی سرریز مقدار دبی عبوری افزایش می‌یابد و این روند افزایش در سرریز $PKW_{1.5}$ بیشتر از سایر مدل‌ها می‌باشد، به‌طوری که در یک عمق آب ثابت روی سرریز، مدل مذکور دارای بیشترین دبی عبوری می‌باشد. میزان دبی عبوری از مدل PKW نسبت به مدل‌های PKW_0 و $PKW_{0.5}$ به‌طور متوسط ۲۳/۵ و ۱۱/۵ درصد بیشتر می‌باشد و همچنین مدل‌های $PKW_{1.5}$ و $PKW_{1.25}$ نسبت به مدل PKW به‌ترتیب ۲٦ و ۱۳ درصد افزایش دبی عبوری را نشان می‌دهند.

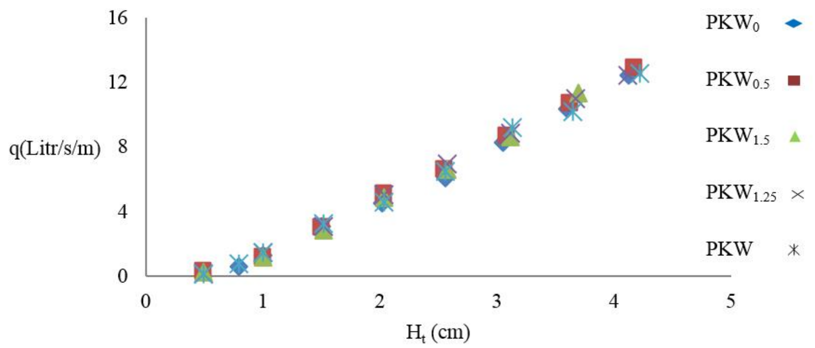
مطابق شکل (۵) در یک هد ثابت میزان دبی در واحد طول کلیهٔ مدل‌ها تقریبا یکسان می‌باشد که به این نکته اشاره دارد که طول سرریز یک عامل مهم و تأثیرگذار در افزایش دبی عبوری می‌باشد و همین افزایش طول کلی سرریز سبب عملکرد بهتر مدل $PKW_{1.5}$ نسبت به سایر مدل‌ها شده است. این موضوع با نتایج اندرسون و تولیس [18] تطابق دارد.

در این قسمت از تحقیق به‌منظور تجزیه و تحلیل ظرفیت تخلیهٔ سرریزهای کلید پیانویی و به‌دلیل پیچیدگی الگوی جریان برروی این سرریزها، بعد از انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری اطلاعات، از معادلهٔ (٤) که معادلهٔ عمومی سرریزها می‌باشد، استفاده شده است [19]. باتوجه به مشخص بودن بار آبی، دبی و مقطع کانال، میزان سرعت متوسط جریان و بار سرعت برآورد شد و درنهایت ضریب دبی مربوط به هر آزمایش محاسبه گردید.

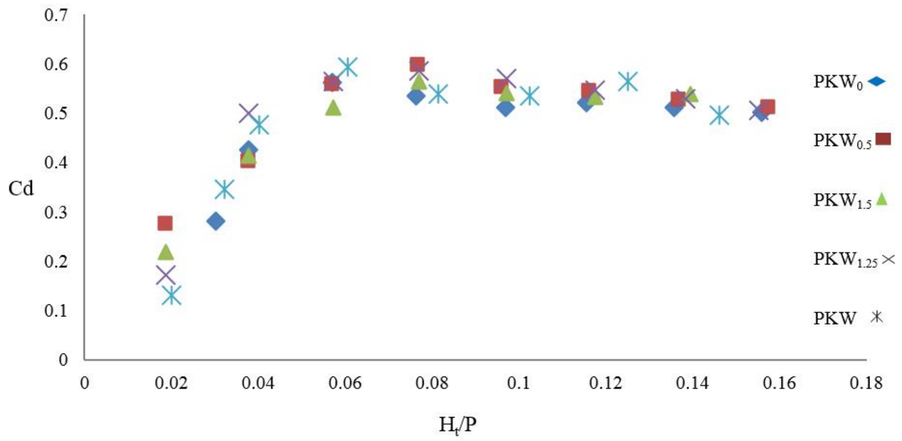
$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g}\, (H_t)^{\frac{3}{2}} L \qquad (٤)$$

در این معادله L کل طول سرریز، H_t کل هد بالادست و C_d ضریب تخلیهٔ سرریز می‌باشد [3]. در شکل (٦) مقادیر ضریب تخلیهٔ سرریزها در برابر پارامتر بی‌بعد $\frac{H_t}{P}$ ترسیم شده است، همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌گردد در ابتدا با افزایش نسبت $\frac{H_t}{P}$ مقادیر ضریب تخلیه افزایش و درادامه با افزایش این نسبت، بسته به نوع مدل، مقدار این ضریب در یک نقطه کاهش می‌یابد که بیان‌کنندهٔ این موضوع است که با افزایش عمق آب برروی سرریز (یا کاهش ارتفاع سرریز) مقدار ضریب تخلیه به‌علت استغراق در کلید خروجی و کاهش توان آن برای خروج آب کاهش می‌یابد که مطابق نتایج کبیری سامانی و جواهری [7]، اندرسون و تولیس [20] می‌باشد. روند تغییرات ضریب تخلیهٔ دو مدل PKW_0 و $PKW_{0.5}$ نسبت به پارامتر H_t/P دارای رفتاری دوگانه بوده است، برای حالتی که نسبت $\frac{H_t}{P} < 0.12$ باشد مقدار ضرایب تخلیهٔ دو مدل مذکور کمتر از مدل PKW می‌باشد و زمانی که نسبت $\frac{H_t}{P} \geq 0.12$ حالت عکس رخ می‌دهد. مدل‌های $PKW_{1.5}$ و $PKW_{1.25}$ به‌ترتیب دارای ۱۵ و ۱۰/۵ درصد ضریب تخلیهٔ بیشتر نسبت به مدل PKW می‌باشند. در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که میزان دبی عبوری و همچنین ضریب تخلیهٔ مدل $PKW_{1.5}$ بهتر از سایر مدل‌ها می‌باشد. وجود شیروانی بالادست سرریز کلید پیانویی و افزایش طول آن، سبب افزایش سطح عبور جریان می‌شود و این امر منتج به کاهش در فشردگی جریان، سرعت جریان و انرژی جریان ورودی می‌گردد.

در این تحقیق همچنین پروفیل سطح آب در طی فرایند آزمایش اندازه‌گیری شد و مشاهده گردید پروفیل سطح آب در روی مدل PKW_0 در ابتدای سرریز دارای یک انحنا می‌باشد که این انحنا و فرورفتگی در مدل $PKW_{0.5}$ کمتر می‌شود و در سایر مدل‌ها که دارای نسبت $\frac{B_o}{B_i} \geq 1$ می‌باشند، این فرورفتگی از بین می‌رود. می‌توان از این رفتار چنین برآورد کرد که وجود شیروانی در کلید خروجی با اندازه‌ای برابر و بزرگ‌تر از کلید ورودی علاوه بر ضریب تخلیه، سبب ایجاد پروفیلی یکنواخت برروی سرریز می‌شود.



شکل ۵ نمودار دبی در واحد عرض و هد مدل PKW و مدل‌ها با نسبت Bo/Bi متغیر



شکل ٦ مقادیر Cd سرریز با نسبت طول شیروانی مختلف در برابر پارامتر بی‌بعد Ht/P

احتمال گرفتگی

به‌منظور بررسی پدیدهٔ انسداد در سرریزهای مذکور از پارامتر بی‌بعد احتمال گرفتگی (π) استفاده شده است، که برابر با تعداد نمونه‌های انسدادیافته برروی سرریز به کل نمونه‌های رهاشده می‌باشد. احتمال گرفتگی نمونه‌چوب‌ها در برابر دو پارامتر بی‌بعد $\frac{D}{H}$ و $\frac{Ld}{H}$ (D و Ld ، قطر و طول متوسط نمونه‌چوب)، به‌ترتیب در اشکال (۷ و ۸) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند در تمامی مدل‌ها، زمانی که نسبت $\frac{D}{H}$ برابر ۱ شود نمونه‌ها در آستانهٔ انسداد از روی سرریز قرار می‌گیرند و در این نسبت درصد عبوری نمونه‌ها قابل توجه نمی‌باشد و چنان‌که احتمال گرفتگی به‌طور متوسط ۰/۹ می‌باشد. احتمال گرفتگی صفر (P=0) در نسبت $\frac{D}{H} < 0.2$ و $\frac{L}{H} < 4.7$ حاصل می‌شود و همچنین در نسبت $\frac{D}{H} > 1.2$ و $\frac{Ld}{H} > 16.6$ احتمال گرفتگی دارای مقدار ۱ می‌باشد. برای حالات حد واسط $\frac{D}{H}$ و $\frac{L}{H}$ روابط (۵ و ٦) برای محاسبه پیشنهاد می‌گردد.

$$P = -0.919\left(\frac{D}{H}\right)^2 + 2.26\left(\frac{D}{H}\right) - 0.409 \quad (۵)$$
$$R^2 = 0.822 \quad 0.2 \leq \frac{D}{H} < 1.3$$

$$P = -0.004\left(\frac{L}{H}\right)^2 + 0.169\left(\frac{L}{H}\right) - 0.704 \quad (٦)$$
$$R^2 = 0.904 \quad 4.7 \leq \frac{D}{H} < 16.7$$

نتایج گویای این امر می‌باشند که احتمال گرفتگی با قطر و طول نمونه‌ها رابطهٔ مستقیم دارد به‌طوری‌که با افزایش قطر یا طول نمونه‌ها این احتمال افزایش و بالعکس با افزایش عمق آب روی سرریز، کاهش می‌یابد. همچنین مدل $PKW_{1.25}$ نسبت به انسداد حساسیت کمتری دارد و احتمال گرفتگی در این مدل نسبت به مدل‌های PKW_0، $PKW_{0.5}$،

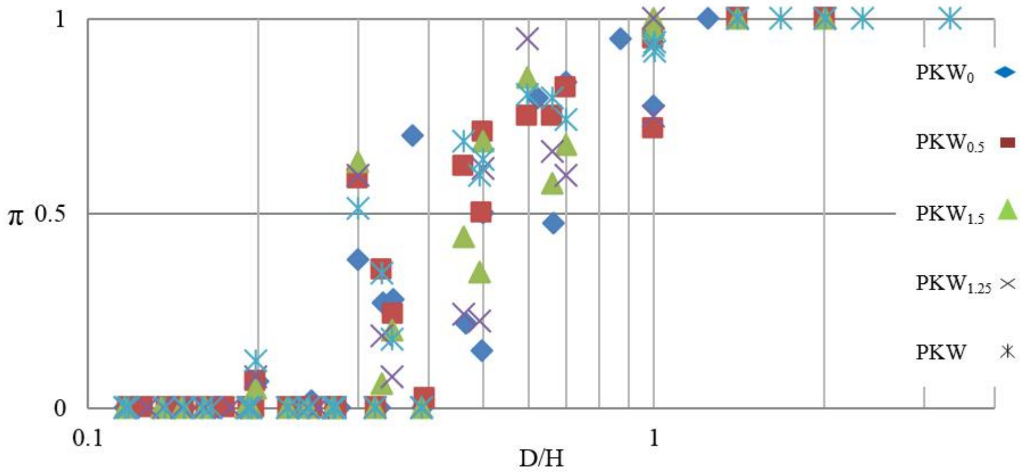
$PKW_{1.5}$ و PKW به‌ترتیب ۱۸/۷، ۳۹/۲، ۷/۸ و ۳۸/۹ درصد کمتر می‌باشد.

در اشکال (۹ و۱۰) احتمال گرفتگی نمونه‌های شاخه‌دار در برابر پارامتر بی‌بعد D/H و L_d/H ترسیم شده است. مطابق اشکال مذبور احتمال گرفتگی صفر در نسبت $\frac{D}{H} < 0.1$ و $\frac{Ld}{H} < 4$ و احتمال گرفتگی یک در نسبت $\frac{D}{H} > 0.44$ و $\frac{Ld}{H} > 11.7$ حاصل می‌شود. نتایج حاضر با نتایج منصوری و احدیان (۱۳۹٤) مطابقت دارند. برای حالات حد واسط $\frac{D}{H}$ و $\frac{L}{H}$، احتمال انسداد نمونه‌های شاخه‌دار را به‌ترتیب می‌توان از روابط پیشنهادی (۸ و ۷) محاسبه کرد.

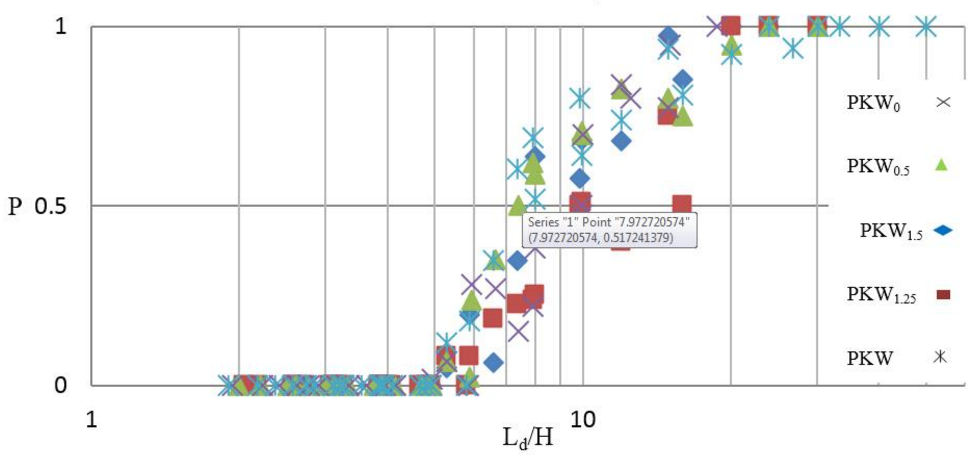
$$P = 3.455\left(\frac{D}{H}\right) - 0.547 \qquad (۷)$$
$$R^2 = 0.912 \qquad 0.16 \le \frac{D}{H} \le 0.44$$

$$P = 0.128\left(\frac{Ld}{H}\right) - 0.507 \qquad (۸)$$
$$R^2 = 0.908 \qquad 4 \le \frac{Ld}{H} \le 11.7$$

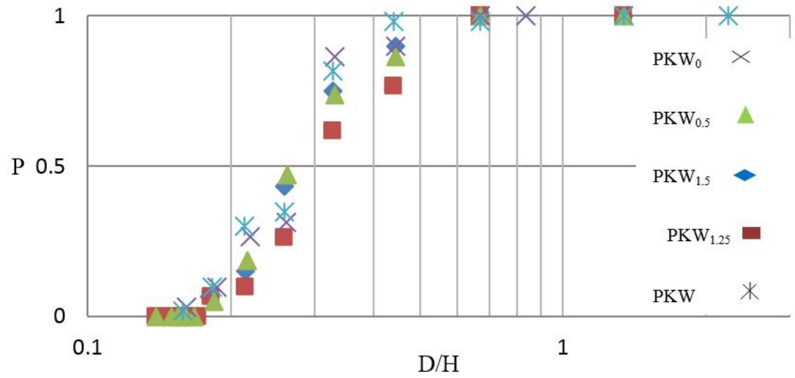
نتایج نشان می‌دهند که مدل $PKW_{1.25}$ نسبت به انسداد ناشی از نمونه‌چوب‌های شاخه‌دار حساسیت کمتری دارد به‌طوری‌که احتمال گرفتگی در این مدل نسبت به مدل‌های PKW_0، $PKW_{0.5}$، $PKW_{1.5}$ و PKW به‌ترتیب ٤۲/۷، ۱٦/۸، ۲۱/۱ و ۳۸/۵ درصد کمتر می‌باشد.



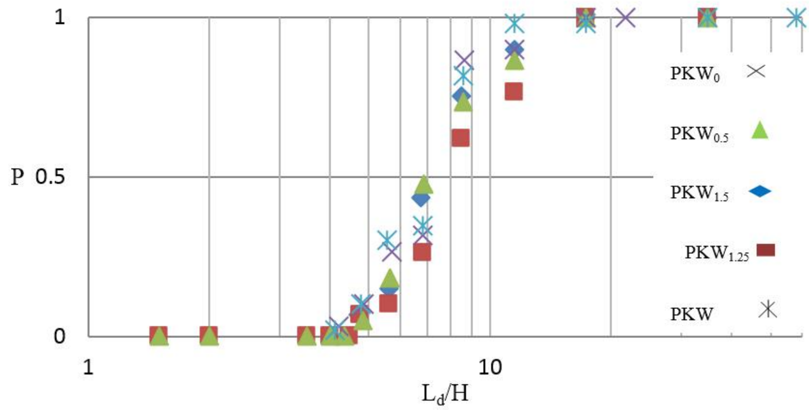
شکل ۷ احتمال گرفتگی نمونه‌های صاف در برابر نسبت D/H



شکل ۸ احتمال گرفتگی نمونه‌های صاف در برابر نسبت L_d/H



شکل ۹ احتمال گرفتگی نمونه‌های شاخه‌دار در برابر نسبت D/H



شکل ۱۰ احتمال گرفتگی نمونه‌های شاخه‌دار در برابر نسبت L_d/H

محتمل‌ترین مکان برای انسداد

در طی فرایند آزمایش تعداد نمونه‌های انسدادیافته در محل‌های مختلف سرریز ثبت گردیده و بر همین اساس محتمل‌ترین محل برای انسداد در سرریز معرفی شده است. نحوهٔ عملکرد دو مدل چوب شاخه‌دار و صاف با یکدیگر متفاوت بوده است. نمونه‌چوب‌های صاف در دامنهٔ وسیعی ($0.2 \le \frac{D}{H} < 1$) از نسبت D/H، باعث انسداد کلید خروجی می‌شوند و همچنین در هدهای خیلی کم ($\frac{D}{H} > 1$) انسداد نمونه‌ها فقط به مدخل کلید ورودی و خروجی منتهی می‌شود و انسداد به بالادست سرریز ادامه می‌یابد. در آزمایش مربوط به نمونه‌های صاف همچنین انسداد دیواره‌های جانبی سرریز بسته به نسبت $\frac{B_o}{B_i}$ متفاوت می‌باشد بر این اساس برای نسبت‌های $\frac{B_o}{B_i} \ge 1$، هنگامی‌که تراز آب کم می‌باشد ($0.5 \le \frac{D}{H} \le 0.7$) نمونه‌ها وارد کلید ورودی می‌شوند و باعث انسداد دیواره‌های جانبی می‌گردند. $\frac{B_o}{B_i} < 1$، انسداد دیوارهٔ جانبی سرریز در تراز آب کمتری نسبت به حالت قبل ($0.7 \le \frac{D}{H} \le 1$) ایجاد می‌شود و در مدل PKW_0 به‌دلیل نداشتن شیروانی بالادست دیواره‌های سرریز سهم قابل‌توجهی از انسداد را به خود می‌دهند. عملکرد نمونه‌های شاخه‌دار بدین صورت بوده است که این نمونه‌ها در هدهای بالا ($0.18 < \frac{D}{H} < 0.26$) وارد کلید ورودی می‌شوند و پس از آن به‌سمت دیواره‌های جانبی تغییر مسیر می‌دهند و منجر به انسداد در دیواره‌های جانبی و به‌طور خیلی کم کلید ورودی می‌شوند؛ و هنگامی‌که $\frac{D}{H} > 0.6$ است، انسداد نمونه‌ها فقط به مدخل کلید ورودی و خروجی منتهی می‌شود و انسداد به بالادست سرریز ادامه می‌یابد. با این حال، در اکثر تراز آب موجود ($0.18 \le \frac{D}{H} \le 1$) انباشته شدن نمونه‌ها در کلید خروجی

سرریز وجود دارد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق بااستفاده از پنج هندسهٔ مختلف از سرریز کلید پیانویی و همچنین پنج نمونه‌چوب به‌ترتیب، ظرفیت تخلیه و پدیدهٔ انسداد ناشی از اجسام شناور در این نوع سرریز مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت می‌توان براساس یافته‌های این تحقیق، نتایج زیر را به‌طور خلاصه بیان نمود:

وجود شیروانی بالادست در سازهٔ سرریز علاوه بر جلوگیری از افت جریان ورودی به سرریز سبب افزایش ظرفیت تخلیهٔ سرریز کلید پیانویی نیز می‌شود.

احتمال گرفتگی علاوه بر نوع چوب (صاف و شاخه‌دار) با قطر و طول نمونه‌چوب رابطهٔ مستقیم دارد. با این حال، نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهند که قطر نمونه‌چوب‌ها نسبت به طول آنها یک پارامتر مؤثر بر انسداد است، به‌طوری‌که افزایش در قطر نسبت به طول نمونه‌ها سبب انسداد بیشتر می‌شود.

در یک هد ثابت درصد عبوری نمونه‌های شاخه‌دار نسبت به نمونه‌های صاف از روی سرریز کمتر است و این امر به‌دلیل وجود خم و شاخه‌ها در نمونه‌های مذکور می‌باشد. در هر دو آزمایش مربوط به نمونه‌های صاف و شاخه‌دار، مدل $PKW_{1.25}$ نسبت به انسداد حساسیت کمتری دارد و نمونه‌ها در تراز آب کمتری نسبت به سایر مدل‌ها از روی آن عبور می‌کنند. همچنین محتمل‌ترین محل برای انسداد براساس مقدار عمق آب برروی سرریز، قطر نمونه‌ها و نوع آنها، متفاوت است ولی می‌توان گفت که قسمت مدخل کلید خروجی بحرانی‌ترین نقطه از لحاظ انسداد است و بخش اعظم نمونه‌ها در این قسمت انسداد می‌یابند.

مراجع

1. Khode, B.V., and Tembhurkar. A.R.,"Evaluation and Analysis of Crest Coefficient for Labyrinth Weir", *World Applied Sciences Journal*, Vol. 11, PP. 835-839, (2010).
2. Lempérière, F., Ouamane, A., "The Piano Keys Weir: A New Cost Effective Solution for Spillways, Hydropower and Dams", *Official Journal of the International Hydropower Association*, Vol. 10 PP.144–149, (2003).
3. Blanc, P., Lempérière, F., "Labyrinth Spillways Have a Promising Future", Journal of Hydropower Dams, Vol.8, PP. 129-131,(2001).
4. Riberio, M.L., Pfister, M., Schleiss,A.J., and Boillat,J.L., "Hydraulic Design of A-type Piano Key Weirs", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, PP. 400–408, (2012).
5. Lempérière, F., Vigny, J.P., Ouamane, A., "General Comments on Labyrinth and Piano Key Weirs: The past and present", *proceedings of the International Conference Labyrinth and Piano Key Weirs*, Liège B, 17–24 CRC Press, Boca Raton, FL,(2011).
6. Anderson, R.M., and Tullis, B.P., "Piano Key Weir Hydraulics and Labyrinth Weir Comparison", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 139, PP. 246-253,(2013).
7. Kabiri-Samani, A., and Javaheri, A., "Discharge Coefficients for Free and Submerged Flow over Piano Key weirs", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, PP. 114–120, (2012).

8. Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., and Laugier, F.,"A Naming Convention for the Piano Key Weirs Geometrical Parameters", *proceedings of the International Conference Labyrinth and Piano Key Weirs,* Liège B, CRC Press, Boca Raton, FL, PP. 271–278, (2011).
9. Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B.J., Pirotton, M., "Piano Key Weir Preliminary Design Method: Application to a New Dam Project", *proceedings of the International Conference Labyrinth and Piano Key Weirs,* Liège B, CRC Press, Boca Raton, FL, PP. 199–206, (2011).
10. Barcouda, M., Cazaillet, O., Cochet, P., Jones, B.A., Lacroix, S., "Cost-effective Increase in Storage and Safety of Most Dams Using Fuse Gates or P. K. Weirs", proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 22st Century, International Commission on Large Dams (ICOLD), Barcelona, Spain, PP. 463–470, (2006).
11. Ouamane, A., and Lempérière, F., "Design of a new economic shape of weir ", proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century, International Commission on Large Dams (ICOLD), Taylor and Francis. London, UK. 463–470,(2006).
12. Ribeiro, M.L., Pfister, M., Schleiss, A.J., "Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigations", Proceedings of the 2nd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs, p, 273-281, CRC Press, Boca Raton, (2013).
13. Pfister, M., Capobianco, D., Tullis, B., and Schleiss, A.J., "Debris-Blocking Sensitivity of Piano Key Weirs under Reservoir-Type Approach Flow", *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 139, PP. 1134-1141, (2013).
14. Pagliara, S., and Carnacina, I., "Temporal Scour Evolution at Bridge Piers: Effect of Wood Debris Roughness and Porosity", *Journal of Hydraulic Research,* Vol.48, PP. 3–13, (2010).
15. Laugier, F., "Design and Construction of the First Piano Key Weir Spillway at Goulours Dam", *International Journal of Hydropower Dams,* Vol.13, PP. 94–100, (2007).
16. Ribeiro, M.L., Bieri, M., Boillat, J.L., Schleiss, A.J., Singhal,G., and Sharma, N.,"Discharge Capacity of Piano Key Weirs", *Journal Hydraulic Engineering,* Vol.138, PP.199–203, (2012).

۱۷. منصوری، کوثر، و احدیان، جواد، «انسداد سرریزهای کلید پیانویی در جریان های آواری با سیستم آزمایش های انفرادی»، علوم و مهندسی آبیاری (مجلهٔ علمی- پژوهشی)، ج. ۳۹، ش. ۳، (پاییز ۹۵).

18. Anderson, R.M., and Tullis, B.P., "Comparison of Piano Key and Rectangular Labyrinth Weir Hydraulics", *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 138, PP.358–361, (2012).
19. Tullis, J. P., Amanian, N., and Waldron, D., "Design of Labyrinth Spillways", *Journal of Hydraul Engineering,* Vol.121, PP. 247–255, (1995).
20. Anderson, R.M., Tullis, B., "Influence of Piano Key Weir geometry on discharge", *proceedings of the International Conference Labyrinth and Piano Key Weirs,* Liège B, CRC Press, Boca Raton, FL, PP.75-80, (2011).

21. Anderson, R.M., "Piano Key Weir Head Discharge Relationships", All Graduate Theses and Dissertations, Utah State University, (2011).